彭真明,李亚林,巫盛洪等. 碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法. 地球物理学报,2008,**51**(3):881～885
Peng Z M, Li Y L, Wu S H, et al. Discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance inversion in carbonate reservoirs. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(3):881～885

碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法

彭真明[1,2],李亚林[2],巫盛洪[2],贺振华[3],周拥军[2]

1 电子科技大学光电信息学院,成都 610054
2 四川石油管理局地球物理勘探公司,成都 610213
3 成都理工大学"油气藏地质及开发工程"国家重点实验室,成都 610059

摘 要 碳酸盐岩储层的 AVO 响应要比碎屑岩储层响应微弱,因此,弹性阻抗(EI)即使在确定了最佳入射角的情况下,要判断碳酸盐岩储层中的流体性质,依然十分困难. 本文提出了一种多角度扩展弹性阻抗(MEEI)反演进行碳酸盐岩储层流体识别方法. 利用已有钻井的测井数据,通过计算目的层段的 MEEI,建立相应的含流体模式,进而建立了碳酸盐岩储层流体检测中的有效气水判据. 通过不同入射角下 EEI 随入射角变化的不同趋势,可以有效识别储层中含气或含水情况,判别储层好坏. 本文方法的有效性在四川盆地某地区实际资料应用中取得了良好的流体检测效果.

关键词 扩展弹性阻抗,多角度反演,流体判据,气水识别,碳酸盐岩储层

文章编号 0001-5733(2008)03-0881-05 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2007-05-11,2008-01-11 收修定稿

Discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance inversion in carbonate reservoirs

PENG Zhen-Ming[1,2], LI Ya-Lin[3], WU Sheng-Hong[3], HE Zhen-Hua[4], ZHOU Yong-Jun[2]

1 *School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 610054, *China*
2 *Sichuan Geophysical Company, CNPC Sichuan Petroleum, Chengdu* 610213, *China*
3 *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*

Abstract AVO response for carbonate reservoirs is fainter than the crack reservoirs. So it is very hard to discriminate gas and water in carbonate reservoirs using elastic impedance (EI), even under the optimal incident angle. In this paper, we propose a novel method for discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance (MEEI) inversion in carbonate reservoirs. We establish the fluid-bearing patterns and effective criterion for discriminating gas and water by computing MEEI of target layers using the known well data. MEEI inversion of real seismic data shows that we can judge whether the reservoir is good or bad and is gas-bearing or water-bearing by observing EEI trend varying with various incident angles. The efficiency of the proposed methods is validated by the application of real data in Sichuan basin.

Keywords Extended elastic impedance, Multi-angle analysis, Fluid criterion, Gas and water discrimination, Carbonate reservoirs

---

基金项目 高等学校博士点学科专项基金(20070614016),航空科学基金(20060112116)及国家自然科学基金项目(60572092)资助.

作者简介 彭真明,男,1966 年生,博士,副教授,2001 年获成都理工大学地球探测与信息技术博士学位. 主要从事信号处理、图像处理、地震叠前反演与储层预测研究工作. E-mail: zmpeng@uestc.edu.cn

1 引 言

弹性阻抗(Elastic impedance,EI)的概念最初由 Connolly[1]提出.由于它包含了比声阻抗(AI)更为丰富的岩性及流体信息,因此,非常适合于各种储层类型的含流体性质识别与岩性预测.国内外很多专家学者据此开展过大量的研究工作. Whitcombe[2,3]针对入射角限制以及反演结果随入射角剧烈变化而给解释工作带来困难的问题,对 Connolly 公式进行修正,推导了扩展弹性阻抗(Extended elastic impedance,EEI)的方程,使之更适合于储层岩性和流体预测,并在北海某油田对实际资料计算了岩性阻抗及流体阻抗分布图,得到了清晰的河道系统成像分布. Kenneth 等[4]也提出了针对 P-SV 转换波问题的横波弹性阻抗(SEI)的概念,用于转换波的岩性反演问题. Ezequiel[5]等又推导了任意角度的转换波弹性阻抗(PSEI)的公式,并直接用于储层含微气(Fizz water)与工业气流(Commercial gas)的区域分布预测.从 2003 年开始,我国地球物理学界[6~15]也开始关注这方面的研究工作,提出了射线弹性阻抗(SEI)、广义弹性阻抗(GEI)、Zoeppritzt 弹性阻抗(ZEI)等概念,并在弹性阻抗的应用方面做了大量的分析研究工作.

笔者对上述的研究成果进行了分析、对比和实际资料的计算,认为 EEI 在碎屑岩储层的岩性识别上效果明显.然而,各种研究实例证明[14~17],碳酸盐岩储层的 AVO 响应相对于碎屑岩储层却要微弱得多.利用文献[3]介绍的最佳角度下 EEI 进行碳酸盐岩储层流体识别却遇到了一定的困难,因为,即便是最佳角度,EEI 对储层内含气或是含水均表现为低值异常.利用这种方法,可以识别储层,但对于储层内的含气或是含水,即储层好坏的判别是无能为力的.为此,本文在 EEI 基础上,根据已有钻井的测井数据(声波、横波、密度)结合测井解释结果,分别计算目的层的 EEI 值,观察 EEI 随不同入射角变化情况,发现储层含气和含水时,其 EEI 变化响应是不同的.即利用多角度扩展弹性阻抗(MEEI)反演进行碳酸盐岩储层流体识别是有效的,并建立了碳酸盐岩储层流体检测中的有效气水判据.本文方法的有效性在四川盆地某地区实际资料应用中,取得了良好的流体检测效果.

2 弹性阻抗与扩展弹性阻抗的定义

弹性阻抗(EI)概念建立在 Aki 和 Richards[18]简化方程基础之上,即如果只考虑入射角小于 30°,则有:

$$R(\theta)=A+B\sin^2\theta, \tag{1}$$

其中,$A=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta v_P}{\bar{v}_P}+\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}\right)$,$B=\frac{\Delta v_P}{2\bar{v}_P}-4\left(\frac{v_S}{v_P}\right)^2\left(\frac{\Delta v_S}{\bar{v}_S}\right)-2\left(\frac{v_S}{v_P}\right)^2\left(\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}\right)$,且 $\bar{v}_P$,Δv_P,$\bar{v}_S$,Δv_S,$\bar{\rho}$,$\Delta\rho$ 分别代表相邻地层的纵波速度、横波速度和密度的平均值与差值.

Connolly[1]构建了一个与声阻抗相似的求反射系数的方程,即:

$$R(\theta)=\frac{\mathrm{EI}_{i+1}-\mathrm{EI}_i}{\mathrm{EI}_{i+1}+\mathrm{EI}_i}\approx\frac{1}{2}\frac{\Delta\mathrm{EI}}{\mathrm{EI}}\approx\frac{1}{2}\Delta\ln(\mathrm{EI}), \tag{2}$$

式中,EI 被称为弹性阻抗.通过对比式(1)和(2),再经过简单运算,就可以得到 EI 的表达式如下:

$$\mathrm{EI}(\theta)=v_P^{(1+\sin^2\theta)}v_S^{(-8K\sin^2\theta)}\rho^{(1-4K\sin^2\theta)}, \tag{3}$$

其中,v_P 为纵波速度,v_S 为横波速度,ρ 为密度,$K=\left[\left(\frac{v_{S_i}}{v_{P_i}}\right)^2+\left(\frac{v_{S_{i+1}}}{v_{P_{i+1}}}\right)^2\right]/2$为纵横波速度比的平均值,$\theta$ 为 P 波入射角.式(3)计算的 EI 值存在的主要问题是,它随入射角变化而急剧降低.这可能会掩盖远、近角弹性阻抗值分析的某些信息,如含流体或岩性变化差异等.

为此,Whitcombe[3]为了消除这种影响,对方程进行了归一化处理,得到新的弹性阻抗表达式:

$$\mathrm{EI}(\theta)=\alpha_0\rho_0\left[\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^a\left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^c\right], \tag{4}$$

式中:α_0,β_0,ρ_0 为常数因子,分别代表储层段 v_P,v_S 和 ρ 的平均值,α,β,ρ 分别为各个深度的 v_{P_i},v_{S_i} 和 ρ_i,且有:

$$\begin{aligned}a&=1+\sin^2\theta,\\ b&=-8K\sin^2\theta,\\ c&=1-4K\sin^2\theta.\end{aligned} \tag{5}$$

利用式(4)计算弹性阻抗可以消除阻抗值随入射角 θ 的变化,并且可以和叠后波阻抗在一个数量级.但对应的反射系数 $R(\theta)$ 可能大于 1,这与实际地震记录有差异.为此,Whitcombe[3]再次对方程做出修正,以 $\tan\chi$ 代替 $\sin^2\theta$,并把原反射系数乘以一个因子 $\cos\chi$,得到扩展弹性阻抗(Extended elastic

impedance，EEI)的表达式：

$$\mathrm{EEI}(\chi)=\alpha_0\rho_0\left[\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^p\left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)^q\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^r\right],\qquad(6)$$

其中

$$p=\cos\chi+\sin\chi,$$
$$q=-8K\sin\chi,$$
$$r=\cos\chi-4K\sin\chi,\qquad(7)$$

式(6)求得的 EEI，既消除了阻抗值随入射角急剧变化的影响，也考虑了控制反射系数在[－1，1]之间，更符合地震记录实际，可以利用它直接进行岩性和流体的检测.

3　MEEI 测井模型与碳酸盐岩储层流体判据

利用 EEI 进行流体检测必须根据先验信息建立流体识别模型，相关文献大都采用了固定角度下 EI 随含水饱和度变化的曲线，进而确定相应的解释方案. 这种方法存在的缺陷一是难以预先确定一个合理的入射角；二是固定入射角情况下分析问题恰恰损失了叠前数据的多角度信息. 我们在研究中发现，取固定入射角(如 16°)对目的层进行 EEI 反演，不论储层含气还是含水，均表现为低值异常. 但还是难以区分储层是含气还是含水. 也有文献介绍了利用远近角度下的有限部分叠加分别进行 EI 反演，对反演结果进行交汇图分析，在交汇图上通过人工划分含气含水数据点，进而圈定气水边界. 这种方法也会受人为因素的影响，因为含气含水的数据点并不是完全分开的，存在很大的解释误差.

本文采用了一种多角度扩展弹性阻抗(Multi-angle extended elastic impedance，MEEI)的流体识别模型. 即在一个有效的入射角范围内对储层段计算多个 EEI 值，观察 EEI 值随入射角的变化趋势. 然后根据先验含流体信息(测井解释结果)建立相应的流体判据. 通过多口井实际测井资料(声波速度、横波速度和密度)的分析，该方法能建立有效的针对碳酸盐岩的含流体模式. 图 1 为 X6 井含气、含气水以及含水的弹性阻抗随入射角(理论角 χ)变化曲线. 该井 4384～4386 m 和 4471～4480 m 井段的测井解释为含气，4488～4511 m 井段为含水. 从图中我们不难看出，含水层的弹性阻抗值随入射角增加而增加，含气井段的弹性阻抗值是随入射角的增加而降低的，而含气水的井段的弹性变化则比较缓慢. 为了进一步证实这种现象和取得一致认识，对该区域其他几口井也进行了同样的分析工作. 图 2 中 X4、X5 井的含气和含水段的弹性阻抗值的变化与图 1 的结论相吻合. X1 井含气井段的弹性阻抗变化也表现出基本一致的变化.

通过多口井数据的实际计算，对于碳酸盐岩储层，多角度扩展弹性阻抗(EEI)分析对于气、水判别是有效的，响应是明显的. 即与声波阻抗一样，不论含气还是含水，储层段 EEI 值均为低值. 但对于储层内的不同流体性质，还具有以下不同的响应，即(1)含水层响应：EEI 随入射角的增大而增大；(2)含气层响应：EEI 随入射角的增大而减小；(3)含气、水层：EEI 随入射角的变化不太明显.

在实验中，个别井含气段也出现了与结论不一致的情况，即含气时，弹性阻抗随入射角变化呈增加趋势. 由于该井缺少横波速度，在弹性阻抗计算中，采用了 Castagna 方程来获取横波速度，而纵、横波速度并非简单的线性关系，导致计算结果的不可靠性. 一般来说，多数层段纵、横波速度之间存在一定的相关性，但是往往纵、横波速度相关性不好的地方，恰恰是有利的储集体位置所在. 因此，MEEI 流体识别中，如缺少横波信息，将可能影响流体预测的精度和结果.

图 1，2 中的横坐标为理论入射角，而非实际入射角，根据分析问题的需要，其变化范围为 0°～90°. 由于实际入射角与 EEI 理论入射角是一个单调增减的关系，而我们的目的是为了观察 EEI 随入射角变化时储层含气或含水的不同变化趋势，而不是实际入射角的具体大小，因此，虽然图中未做转换，却不会影响分析问题的结果.

4　应用实例与分析

通过以上的 MEEI 测井分析、正演计算建立气水判据后，就可以在叠前动校和时间偏移的角道集地震数据上进行实际资料的反演. 在研究区，选取过含气和含水井的两条二维测线，进行 MEEI 反演.

图 3，4 分别为过典型的含气与含水井的两条二维测线的 MEEI 反演和流体检测结果. 图 3(a)、(b)和(c)分别为实际入射角 5°、13°、21°inline 450(过 X4 井)测线含气储层段的 EEI 反演剖面，图中的深蓝色代表 EEI 为低值. 从图中椭圆标记范围内容易看出，随着入射角的增加，储层反演剖面的颜色逐渐变深，表明 EEI 值随入射角增加而减小. 图 4 为 inline 557 测线储层段 5°、15°和 25°的 MEEI 反演结

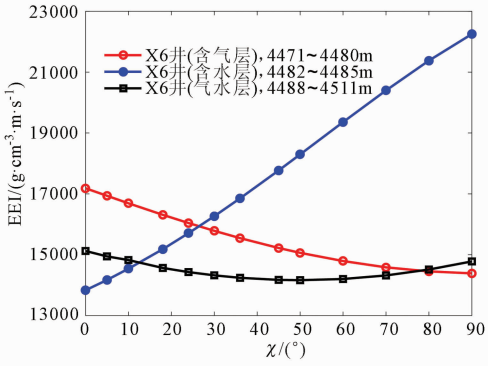

图1 X6井含气、水层段EEI随入射角变化

Fig.1 EEI varying with the incident angle of gas-bearing and water-bearing reservoirs of well X6

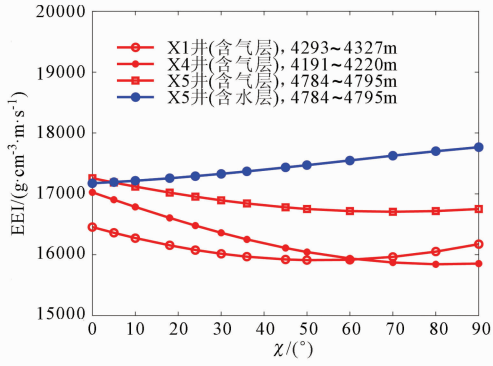

图 2 多口井含气、水层段 EEI 随入射角变化

Fig.2 EEI varying with the incident angle of gas-bearing and water-bearing reservoirs of multiple wells

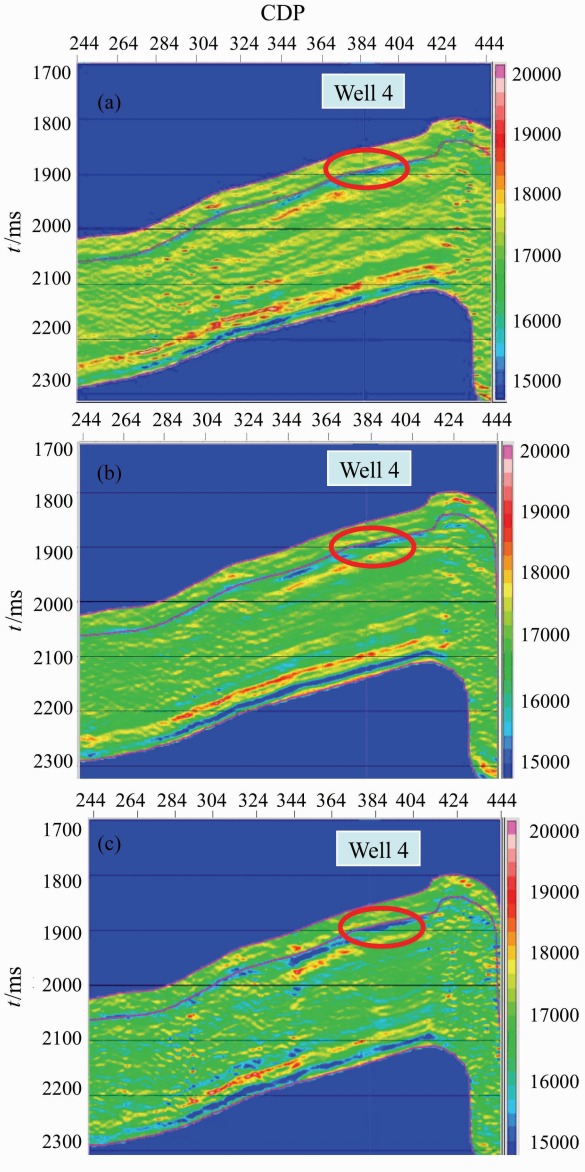

图 3 MEEI 反演与含气检测结果（inline 450，过 X4 井）

Fig. 3 MEEI inversion and the results of gas detection results (inline 450, across well X4)

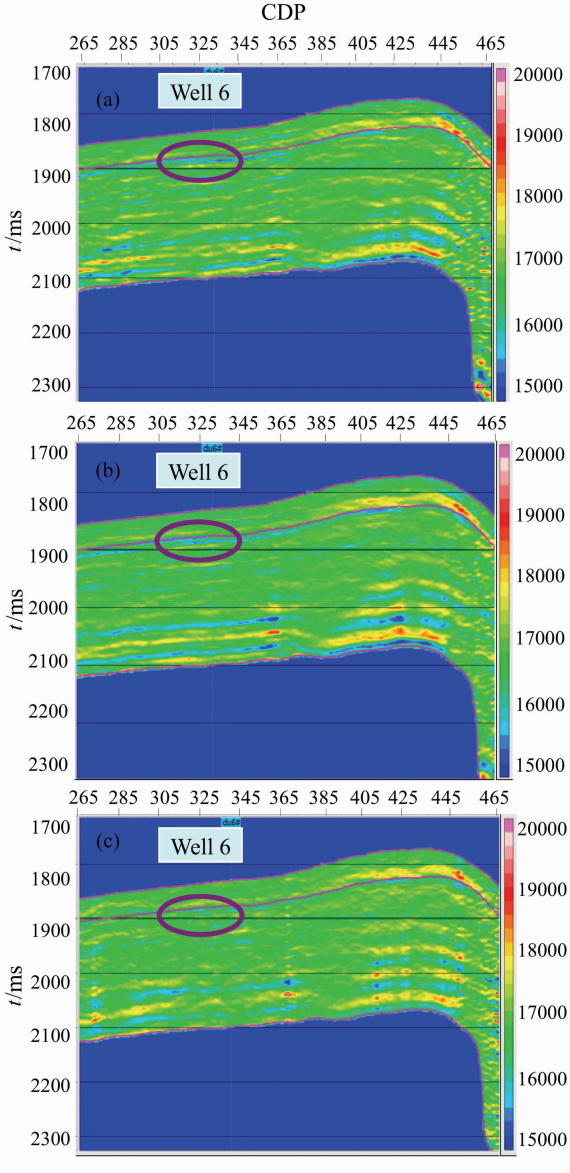

图 4 MEEI 反演与含水检测结果（inline 557，过 X6 井）

Fig. 4 MEEI inversion and the results of water detection results (inline 557, across well X6)

果. 该测线过X6井，测井解释产层为主要含水层. 从图中椭圆标记处容易看到，随着入射角的增加，储层反演剖面的颜色逐渐变浅，表明 EEI 值随入射角增加而增大.

以上实际资料的反演结果与建立的流体判据完全吻合. 我们对工区约 100 m^2 的三维资料进行了 MEEI 反演. 工区包含已有钻井 6 口，利用其中的 3 口井作为约束，进行基于模型的反演. 并把其余 3 口井作为未知井，进行了符合性检验. 流体检测的符合率达 100%. 充分说明了本文研究的 MEEI 方法对流体识别的有效性.

5　结　语

本文通过对多角度扩展弹性阻抗(MEEI)的计算、分析和对实际地震数据的反演，认为 MEEI 反演可用于碳酸盐岩储层流体检测与气水识别，且优于固定角度的 EEI 反演以及远近角度的 EEI 交汇图分析. 文章通过对储层段典型含气和含水井的测井数据分析、正演计算，建立了相应的气水识别模式和有效的流体检测判据. 虽然本文主要是针对碳酸盐储层开展的流体检测方法研究，但对于砂泥岩地层的岩性识别也同样具有借鉴的意义.

参考文献(References)

[1] Connolly P. Elastic impedance. *The Leading Edge*, 1999, **18**(4): 438～452

[2] Whitcombe D N. Elastic impedance normalization. *Geophysics*, 2002, **67**(1): 60～62

[3] Whitcombe D N. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction. *Geophysics*, 2002, **67**(1): 63～67

[4] Kenneth D, Martin L, Hege R. Shear-wave elastic impedance. *The Leading Edge*, 2000, **19**(11): 1222～1229

[5] Ezequiel F G, Tapan M, Gray M, et al. Near and far offset P-to-S elastic impedance for discriminating fizz water from commercial gas. *The Leading Edge*, 2003, **22**(10): 1012～1015

[6] 倪　逸. 弹性波阻抗计算的一种新方法. 石油地球物理勘探, 2003, **38**(2): 147～150
Ni Y. A new method for calculation of elastic wave impedance. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2003, **38**(2): 147～150

[7] 马劲风. 地震勘探中广义弹性阻抗的正反演. 地球物理学报, 2003, **46**(1): 118～124
Ma J F. Forward modeling and inversion method of generalized elastic impedance in seismic exploration. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2003, **46**(1): 118～124

[8] Ma J F, Morozov I B. Ray-path elastic impedance. CSEG National Convention, 10～12 May 2004

[9] Ma J F, Morozov I B. Fluid detection study from Zoeppritz elastic impedance, 75th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 2006

[10] 甘利灯，赵邦六，杜文辉等. 弹性阻抗在流体与岩性预测中的潜力分析. 石油物探, 2005, **44**(5): 504～508
Gan L D, Zhao B L, Du W H, et al. The potential analysis of elastic impedance in the lithology and fluid prediction. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2005, **44**(5): 504～508

[11] 王保丽，印兴耀，张繁昌. 弹性阻抗反演及应用研究. 地球物理学进展, 2005, **20**(1): 89～92
Wang B L, Yin X Y, Zhang F C. Elastic impedance inversion and its application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(1): 89～92

[12] 曹孟起，王九栓，邵林海. 叠前弹性波阻抗反演技术及应用. 石油地球物理勘探, 2006, **41**(3): 323～326
Cao M Q, Wang J S, Shao L H. Prestack elastic wave impedance inversion technique and application. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2006, **41**(3): 323～326

[13] 苑书金，于常青. 各向异性介质中的弹性阻抗及其反演. 地球物理学进展, 2006, **21**(2): 520～523
Yuan S J, Yu C Q. Elastlc impedance and seismic inversion in anisotropic media. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(2): 520～523

[14] Peng Z M, Li Y L, Ye L, et al. Discriminating gas and water in carbonate reservoirs using multi-angle extended elastic impedance inversion. SPG/SEG Kunming 2006 International Geophysical Conference, Expanded abstracts, 168～171, Oct. 2006

[15] 彭真明，李亚林，梁　波等. 叠前弹性阻抗在储层气水识别中的应用. 天然气工业, 2007, **38**(4): 43～45, 52
Peng Z M, Li Y L, Liang B, et al. Application prestack elastic impedance inversion in gas and water recognition of the reservoir. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2007, **38**(4): 43～45, 52

[16] Li Y, Goodway B, Downton J. Recent advances in application of AVO to carbonate reservoirs. *Cseg Recorder*, 2003, 35～40

[17] 王大伟，刘　震，陈小宏等. 利用时移地震资料划分油藏流体流动单元的可行性分析. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 592～597
Wang D W, Liu Z, Chen X H, et al. Feasibility analysis on division of flow units using time-lapse seismic data. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2007, **50**(2): 592～597

[18] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology: Theory and Methods. Volume 1, W. H. Freeman and Company, 1980

(本文编辑　汪海英)